

УДК 622.364:550.34

РАЗВИТИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО И МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНТРОЛЯ НАВЕДЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ НА ХИБИНСКИХ АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ



А. А. КОЗЫРЕВ¹,
зав. отделом геомеханики,
проф., д-р техн. наук



В. С. ОНУПРИЕНКО²,
главный инженер



С. А. ЖУКОВА¹,
старший научный сотрудник,
канд. техн. наук,
svetlana.zhukova@yandex.ru



С. Г. ЖУРАВЛЕВА¹,
старший научный сотрудник,
канд. техн. наук

¹ Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия
² Кировский филиал АО «Апатит», Кировск, Россия

Введение

На сегодняшний день по-прежнему актуальными в России и мире остаются проблемы горных ударов и землетрясений при разработке месторождений полезных ископаемых, а вместе с ними и задачи управления состоянием массива горных пород (ГП) для прогноза и предотвращения опасных геодинамических явлений [1–8]. Одним из наиболее эффективных методов контроля состояния массива ГП является мониторинг сейсмичности, который можно применять при прогнозе удароопасности наряду с другими методами оценки и прогноза состояния горного массива [9–11].

В конце 1980-х годов стала очевидной необходимость создания на рудниках производственного объединения (ПО) «Апатит» (сегодня АО «Апатит») автоматизированной системы и методики сбора и обработки сейсмической информации в связи с интенсификацией крупномасштабных горных работ и участвовавшимися случаями динамических проявлений горного давления на отработываемых апатит-нефелиновых месторождениях Хибинского массива [11]. Применение такой системы в настоящее время способствует более точной диагностике состояния массива ГП и прогнозу горных ударов.

В статье представлены результаты многолетних исследований сейсмичности Хибинского массива, а также обзор этапов становления и эволюции систем сейсмического мониторинга и методов прогноза сейсмической опасности.

Выполнен обзор исторических землетрясений в Хибинах. Показаны основные этапы становления систем сейсмического мониторинга на рудниках Хибинского массива. Проведено исследование особенностей активизации сейсмичности при ведении горных работ. Представлены основы двух прогнозных методик: регионального прогноза удароопасности при непрерывной регистрации сейсмичности и современного вероятностного подхода к оценке сейсмической опасности.

Ключевые слова: наведенная сейсмичность, мониторинг, региональный прогноз, локальный прогноз, горные удары, землетрясения, Хибинский массив.

DOI: 10.17580/gzh.2020.09.02

Объект исследований

Хибинский массив Кольского полуострова представляет собой крупную высоконапряженную щелочную интрузию центрального типа, где отмечено наличие разнообразных форм тектонических структур [12]. Выявление современных активных разломов, проявляющих свою деятельность в настоящее время, особенно важно, так как их влияние на напряженно-деформированное состояние массива ГП существенно. Одним из основных геомеханических факторов, определяющих устойчивость выработок и конструктивных элементов систем разработки на апатитовых рудниках Хибин, является высокая тектоническая напряженность массива пород [13]. О продолжающемся тектоническом формировании этого района также свидетельствуют современные поднятия массива со скоростью от 0,5 до 2–4 мм/год и периодические землетрясения интенсивностью до 4–6 баллов [14].

Добыча апатит-нефелиновой руды в Хибинском массиве ведется подземным и открытым способами с 1929 г., что обусловило нарушение равновесия иерархично-блочной структуры массива. Совместные постоянные тектонические и технологические воздействия на массив способствуют формированию большого числа трещин и магистральных разрывов, что оказывает существенное влияние на уровень сейсмичности массива и увеличивает вероятность возникновения сильных геодинамических явлений, которые происходят здесь уже более 70 лет [11].

Краткий обзор землетрясений в Хибинах

23 сентября 1948 г. на Кукисвумчоррском месторождении норвежскими сейсмическими станциями впервые было зарегистрировано землетрясение в Хибинском массиве (магнитудой 4 ± 1), указавшее на его современную тектоническую активность [15, 16]. Позднее произошло еще несколько землетрясений: 8 и 31 августа 1955 г., 9 февраля 1960 г., 30 сентября 1974 г. Магнитуды этих землетрясений оценены как 4 ± 1 , 3 ± 1 , $2,7 \pm 1$, $4,2 \pm 1$ соответственно.

Ощутимые сотрясения в подземных выработках и на поверхности вблизи рудников вызвали землетрясения, произошедшие 8 января, 18 августа и 29 сентября 1981 г. магнитудой 2,1; 3,2; 3,1 соответственно [11].

17 мая 1981 г. впервые была зафиксирована реакция массива горных пород на взрывное воздействие: произошла серия сейсмических событий, магнитуда самого крупного из которых составила 3.

В работе Н. М. Сырникова и В. М. Тряпицына «О механизме техногенного землетрясения в Хибинах» утверждается, что 16 апреля 1989 г. на Кировском руднике произошло техногенное землетрясение с магнитудой 4,2 во время проведения массового взрыва [17], на сегодняшний день оно остается самым мощным. В дальнейшем (по данным на апрель 2020 г.) зарегистрировано еще 55 случаев мощных динамических проявлений горного давления на рудниках. Наиболее разрушительным сейсмическим событием последних лет стал горно-тектонический удар, произошедший 9 января 2018 г. на месторождении Апатитовый Цирк [8].

На рис. 1 показано количественное распределение геодинамических явлений, произошедших в Хибинском массиве и ощущаемых на поверхности.

Становление и развитие автоматизированной сейсмической системы

Для изучения состояния массива горных пород и разработки методики прогноза горных ударов в 1980-х годах специалистами Горного института Г. А. Марковым, В. И. Ивановым, А. А. Козыревым, В. В. Тимофеевым и Института информатики и математического моделирования технологических процессов КНЦ РАН (в то время КФ АН СССР) А. Х. Ерухимовым, М. М. Каганом, С. Н. Дремовым и М. В. Коликовым были инициированы исследования и в дальнейшем разработана автоматизированная система сбора и обработки сейсмической информации. Совместно с сотрудниками Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе (Д. И. Фроловым и Н. Г. Томилиным) и работниками ПО «Апатит» (В. А. Кайтмазовым, А. С. Юровым, В. С. Свиным, А. В. Подгорбунским, М. В. Аккуратовым и др.) была разработана методика прогноза региональной удароопасности, основанная на результатах непрерывного мониторинга сейсмичности, и реализован программно-аппаратный комплекс для мониторинга состояния массива ГП и прогноза горных ударов, что детально отражено в отчете о научно-исследовательской работе «Разработка

методов и системы автоматизированного контроля состояния массива горных пород в целях прогноза удароопасности» 1990 г. (далее отчет НИР).

Автоматизированная система контроля состояния массива (АСКСМ) включала следующие подсистемы, которые в дальнейшем получили развитие и продолжают функционировать в ее модернизированном варианте:

- сбор исходной информации (преобразование механической энергии колебаний среды в электрические сигналы) с применением аналоговых средств обработки информации (с 2003 г. – цифровых);
- предварительная обработка информации (выделение полезных сигналов, фильтрация по временному критерию) с учетом конфигурации сети и скоростей распространения сейсмических волн в массиве;
- расчет параметров события (время, координаты гипоцентра, сейсмическая энергия от 100 Дж, идентификация источника события, частотный состав сейсмических волн, знаки прихода продольных сейсмических волн на пункты регистрации);
- обобщающий анализ накопленной информации в объеме, обеспечивающем прогнозную оценку состояния массива в контролируемом районе [18].

Первоначально методика регионального прогноза была основана на выявлении зон повышенной сейсмичности и определении степени сейсмоопасности, а не удароопасности, как в настоящее время. Сейсмоактивные зоны рассматривали в качестве очаговых образований со статистическими характеристиками, существенно отличающимися от фоновых значений. Прогностическими признаками являлись плотность пространственно-временного распределения сейсмичности, максимальная ожидаемая энергия события и коэффициент вариации распределения энергии. Критерий опасности характеризуется превышением указанных признаков над их критическими значениями, что позволяет установить 3, 2 или 1-ю степень сейсмоопасности. При выявлении сейсмоопасных зон в зависимости от их степени было регламентировано взаимодействие между подразделениями рудника, а для информационного обмена в системе контроля горного давления и прогноза горных ударов разработана схема взаимодействия должностных лиц ПО «Апатит» с сотрудниками институтов – разработчиков системы (рис. 2).

Разработанная АСКСМ была внедрена как подсистема на Кировском руднике (Кукисвумчорское месторождение) в две очереди: 1985 г. – для осуществления контроля за северным

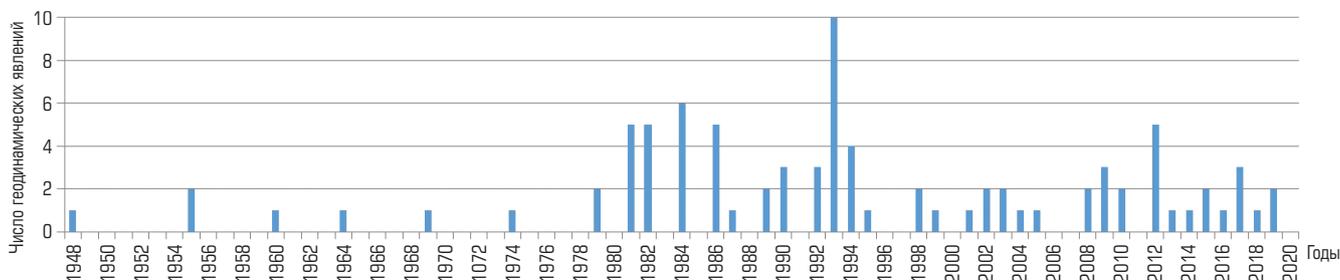


Рис. 1. Ежегодное распределение числа геодинамических явлений в Хибинском массиве

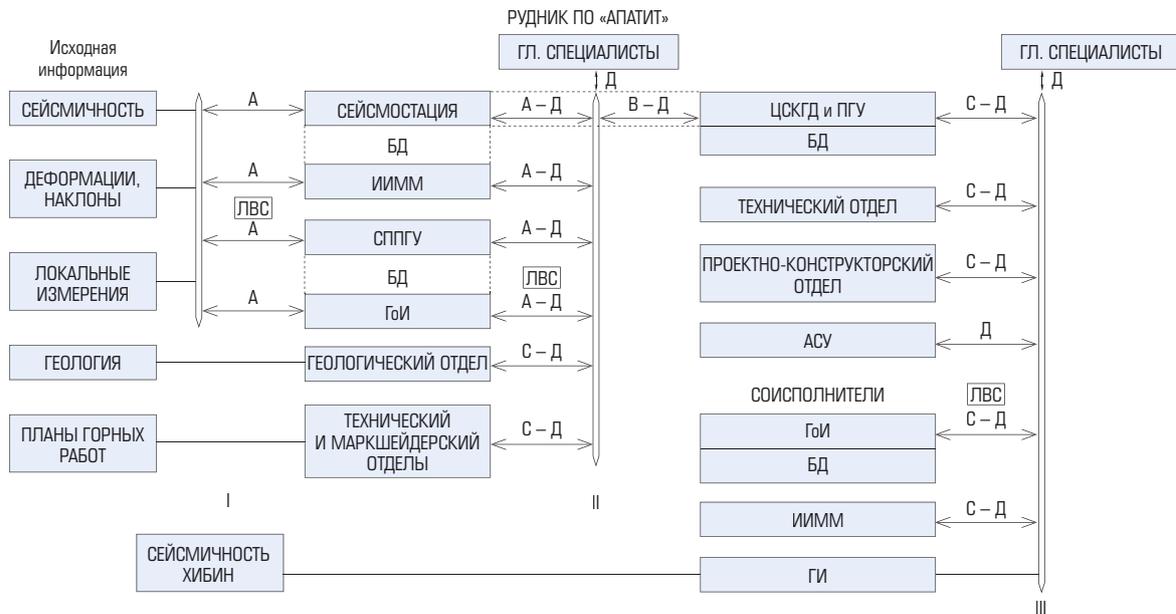


Рис. 2. Проектная схема информационного обмена в системе контроля горного давления и прогноза горных ударов из отчета НИР:

БД – база данных; ГИ – Геологический институт; ГоИ – Горный институт; ИИММ – Институт информатики и математического моделирования технологических процессов; ЛВС – локальная вычислительная сеть; СППГУ – Служба прогноза и предупреждения горных ударов; ЦСКГД и ПГУ – централизованная система контроля горного давления и прогноза горных ударов).

А – исходная текущая информация $T = 1$ сут; В – оперативный анализ $T = 7, 30$ сут; С – прогноз 30, 60, 120 сут; Д – по запросу;

I–III – уровни обобщения информации

флангом шахтного поля; 1987 г. – для контроля за всем шахтным полем рудника. В 1994 г. в качестве подсистемы АСКСМ была реализована для контроля обрабатываемого блока-целика на Юкспорском руднике (Юкспорское месторождение). Через шесть лет подсистема АСКСМ была установлена для мониторинга зоны стыковки подземного Расвумчоррского рудника (месторождение Апатитовый Цирк) с карьером Центрального рудника (месторождение Плато Расвумчорр).

В период с 2003 по 2007 г. система контроля была реконструирована: аналоговая система сбора сейсмической информации венгерского производства Geos ltd. заменена на цифровую телеметрическую систему сбора (ТСС) российского производства НПО «Системотехника» г. Иваново [19] и создана единая АСКСМ Кировской подсистемы, в зону контроля которой вошли Кукисвумчоррское и Юкспорское месторождения. Объединение позволило значительно расширить зону уверенной регистрации сейсмических событий и вести мониторинг сейсмоактивного Саамского разлома, где еще в 2003 г. отмечалась активизация сейсмичности: было зарегистрировано сейсмическое событие магнитудой 3,1 (по данным КРСЦ ГС РАН, сейчас – КоФ ФИЦ ЕГС РАН), сопровождавшееся длительной афтершоковой активностью. В 2011 г. также была реконструирована ТСС АСКСМ Расвумчоррской подсистемы, что позволило обеспечить бесперебойную работу оборудования и включить в зону контроля вновь введенные добычные блоки и горизонты.

В 2012 г. морально устаревшая программа обработки сейсмических сигналов, работающая под оболочкой OS/2, заменена на новую, работающую под Windows. Благодаря внедрению новой

программы число определяемых параметров сейсмического события возросло; к уже существующим добавились: магнитуда, сейсмический момент, угловая частота, статический и динамический сброс напряжения в очаге и др. [20].

Все изменения можно считать своевременными, так как они позволили АСКСМ надежно работать в течение тридцати лет. За это время, однако, практически без изменений осталась методика прогноза удароопасности (по результатам непрерывного контроля сейсмичности массива).

Действующая методика прогноза основана на определении отклонений текущего уровня сейсмичности (по параметру суммарной длины трещин для пространственного окна размером 50×50 м) от среднелетних значений сейсмичности, рассчитанных для всей зоны регистрации [18]. Дополнительным прогностическим параметром является максимальная ожидаемая энергия сейсмического события, которая определяется на основе графика повторяемости сейсмических событий. Результатом использования методики служат карты удароопасных зон в изолиниях, оконтурированных районов, для которых текущий уровень сейсмичности превышает среднелетний в определенное число раз (критические значения для определения степени региональной удароопасности: N1 – 1-я степень «Опасно»; N3 – 3-я степень «Неопасно») [18]. На рис. 3 в качестве примера показана карта удароопасных зон с выделенными зонами 1-й и 3-й степеней удароопасности.

Как показала практика, зоны 1-й степени удароопасности проявляются при различных условиях. В отдельных случаях проявление этих зон происходит через некоторое время после возникновения зон 3-й степени и зачастую охватывает меньший по площади

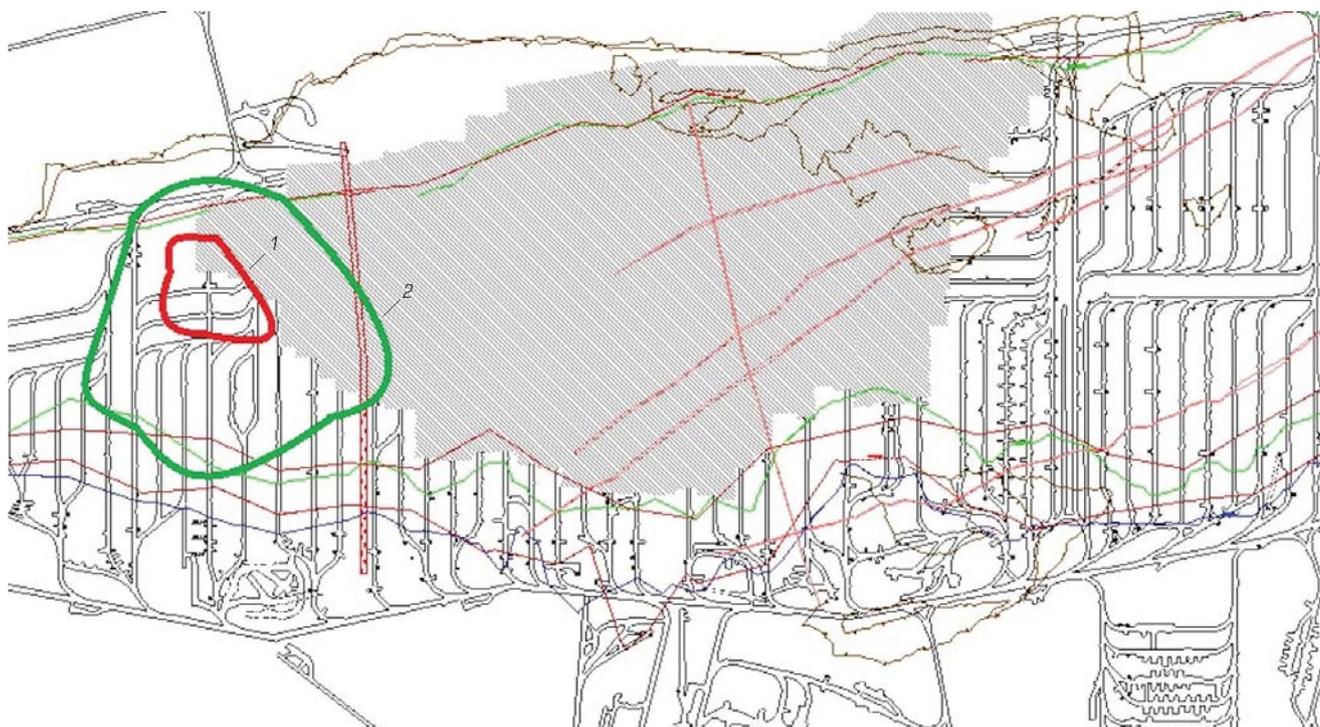


Рис. 3. Карта удароопасных зон (демонстрационный пример, не является реальным случаем).

1, 2 – участки 1-й и 3-й степени удароопасности соответственно

участок, что отражает развитие сейсмического процесса и нарастание сейсмичности. Но также зоны 1-й степени удароопасности могут проявляться уже после реализации сильного сейсмического события, и в таком случае не отражается процесс подготовки сильного события. При этом в выходных данных отсутствует информация о значениях критерия, что не позволяет провести дальнейшую оценку развития сейсмического процесса, а также определить, например в случае выявления зон 3-й степени удароопасности, насколько максимальные значения критерия близки к критическим (для установления 1-й степени). Что касается зон 2-й степени удароопасности, то на одном из этапов применения методики промежуточные значения этого критерия перестали использоваться из-за низкой информативности.

Изменения критических значений степени региональной удароопасности согласовывали на комиссиях по горным ударам предприятия. Пороговое значение критерия N_1 в разное время составляло от 2000 до 40000 (изменялось только в большую сторону). Как показала практика, такие изменения не решили проблему правильного определения удароопасных зон. По мнению авторов, само значение критерия свидетельствует о его малой информативности.

Таким образом, на сегодняшний день действующая методика требует доработки для выхода на новый уровень, соответствующий передовой практике применения сейсмических данных горнодобывающими предприятиями мира. Методика должна быть более удобной и гибкой в применении, позволять не только выявлять потенциально опасные участки, но и проводить анализ динамики сейсмического процесса.

Что касается современного состояния сети сейсмического мониторинга в целом, то она охватывает всю площадь ведения горных работ на контролируемых месторождениях и обеспечивает достаточную точность и надежность регистрации для ежедневного контроля состояния массива ГП.

Вероятностный подход к прогнозу сейсмоопасности

В Горном институте КНЦ РАН проводят многолетние исследования по проблеме прогноза проявлений сейсмичности при ведении горных работ. Разработаны методические положения комплексного прогноза критических состояний участков массивов ГП [11], заключающиеся в одновременном рассмотрении отдельных прогностических критериев, отражающих какую-либо одну из особенностей процесса разрушения [21]. Разрабатываются подходы к вероятностному прогнозу сильных сейсмических событий на основе методики построения карт ожидаемых землетрясений [22].

Отметим, что на сегодняшний день в России и в мире проводят большое число исследований в области разработки методов прогноза проявлений сейсмичности при ведении горных работ. Рассматривают широкий спектр подходов к прогнозу сейсмической опасности: применяют различные прогностические критерии (например, в работах [9, 22] и др.), проводят моделирование ожидаемой сейсмичности при планировании горных работ [23], а также другие подходы. Конечным результатом многих методов является разделение шахтного поля на участки с различным уровнем сейсмической опасности. Более сложной является задача прогноза сейсмической опасности по времени, т. е. выявления опасных и неопасных периодов для различных участков рудника.

Практика применения методов прогноза сейсмической опасности показывает, что прогноз не всегда может быть успешным: возможны как ложная тревога, так и пропуск цели (т. е. проявление неспрогнозированных сильных сейсмических событий из-за сложного процесса подготовки таких событий в условиях постоянно меняющейся горно-геологической ситуации на обрабатываемых месторождениях).

Особенностью разрабатываемой авторами методики прогноза является применение комплекса прогностических критериев для выявления участков, потенциально опасных по проявлению сильных сейсмических событий, или серии событий, которые могут привести к разрушению в выработках. Целевое назначение методики – среднесрочный (1 мес) и краткосрочный (ежедневный) прогнозы.

Для среднесрочного прогноза предлагается ежемесячное выявление потенциально опасных участков: 3D-районирование шахтного поля по значениям вероятности возникновения сильных сейсмических событий при наличии аномалии по комплексу прогностических критериев (фрактальный, наклон графика повторяемости сейсмических событий, концентрационный). Для этого строят пространственно-временные карты распределения значений комплексного критерия и рассчитывают ретроспективные статистические характеристики [24], в том числе значения вероятностей для отдельных участков массива. Такое районирование массива ГП является важной составляющей предлагаемой методики, что принципиально отличает ее от действующей сегодня на Хибинских рудниках.

Для оперативной оценки уровня сейсмической опасности предлагается рассматривать динамику значений комплексного критерия (также в трехмерном варианте). Месторождение дифференцируется на участки с различным уровнем сейсмической активности (фоновым, повышенным или аномально высоким). Ежедневное применение такого подхода позволит соответствующим службам оценить динамику изменения сейсмичности на выбранных участках и принять определенные управленческие решения.

Для проверки предложенной методики проведен ретроспективный анализ сейсмичности Кукисвумчоррского месторождения. Рассмотрены 118 сильных сейсмических событий энергетического класса $K = 6-8$. Установлено, что до 90 % сейсмических событий предварялись сейсмической активностью (остальные 10 % – события одиночные). При этом наибольшее число таких сейсмических событий произошло на участках массива, где значения комплексного критерия составили от 0,5 до 0,7. Этот диапазон значений считается уровнем тревоги. Аномально высокие значения уровня тревоги (более 0,7) встречаются реже, поэтому к этим участкам необходимо повышенное внимание службы прогноза и предотвращения горных ударов предприятия. Как показали исследования, таким участком на Кукисвумчоррском месторождении уже несколько лет является район Саамского разлома.

На **рис. 4, а** представлена карта вероятностей для среднесрочного прогноза в районе разлома, совмещенная с фактически произошедшими событиями. Для расчета значений вероятностей на различных участках применяют данные о ранее произошедших на этих участках сильных сейсмических событиях и особенностях

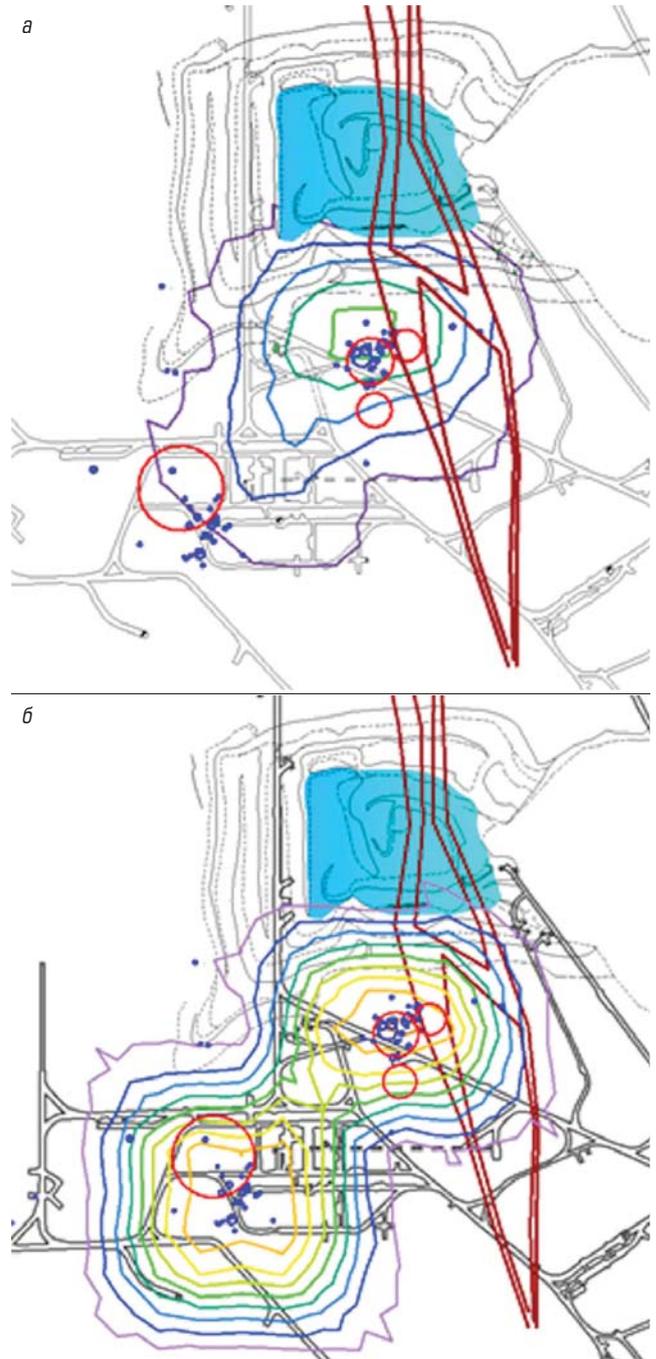


Рис. 4. Прогнозные карты, совмещенные с фактически произошедшими событиями:

а, б – среднесрочный и краткосрочный прогноз соответственно

их проявления (событие предварялось тревогой (аномалией) по комплексу прогностических критериев либо ему предшествовало повышение сейсмической активности, но уровень тревоги не превышен; одиночное событие и др.). С учетом этих данных определяют вероятность возникновения сильного сейсмического события при наличии аномалии по комплексу прогностических критериев. Однако появляются новые сейсмоактивные участки, где ранее не происходили сильные сейсмические события, причем эти участки

зачастую проявляются на границе выявленных зон, что отражает процесс продвижения работ. Для таких участков не может быть определено значение вероятности возникновения сильного события, даже при наличии аномалии по комплексному критерию.

Представленный пример (см. рис. 4, а) свидетельствует о том, что наиболее сильное событие (окружность большего радиуса) произошло на участке, где ранее не были зарегистрированы сильные сейсмические события, поэтому значение вероятности на данном участке не определено (близко к нулю). Однако по результатам оценки динамики комплексного критерия, т. е. при краткосрочном прогнозе (см. рис. 4, б), участок, где в дальнейшем произошло сильное событие, определяется как потенциально опасный – изолиниями оконтурена зона с разными уровнями тревоги (вероятность до 0,75), а также нанесены эпицентры произошедших сильных сейсмических событий. Для группы сильных сейсмических событий (три события) участок определяют как потенциально опасный и при среднесрочном, и при краткосрочном прогнозе. Карты построены за несколько дней до реализации этих сейсмических событий.

Отметим, что для более точной локализации таких участков и выделения опасной зоны проводятся исследования по оценке эффективности объединения результатов прогнозов, полученных двумя представленными способами. Такое объединение зачастую способствует более точному прогнозу по местоположению сейсмических событий, но, к сожалению, одновременно может привести и к возрастанию числа неспрогнозированных событий (т. е. пропусков цели).

В настоящее время также проводят исследования по оценке времени ожидания сильного сейсмического события после объявления тревоги в опасной зоне, которое в среднем составляет от 5 дней до 1 мес. На сегодняшний день результаты ретроспективной оценки представленной методики позволяют говорить об определении с приемлемой точностью возможного места возникновения сильного события. Более точное определение времени возникновения сильного события остается предметом дальнейших исследований.

Кроме того, считается, что для получения более надежного прогноза необходимо рассматривать результаты анализа данных сейсмических наблюдений совместно с другими методами, что позволит выявить наиболее опасные участки относительно возникновения геодинамических явлений. Например, с этой целью авторами применяется комплексирование сейсмических данных с результатами моделирования напряженно-деформированного состояния массива ГП [8].

Таким образом, усовершенствованная методика позволяет выявить сейсмоопасные участки массива горных пород, ранжирование которых по степени опасности и комплексирование с данными других имеющихся методов контроля позволит горнодобывающему предприятию своевременно планировать профилактические мероприятия, а также принимать оперативные решения.

Заключение

В работе представлен краткий обзор этапов становления и эволюции систем сейсмического мониторинга и методов прогноза сейсмической опасности.

Разработанная АСКСМ успешно применяется на рудниках АО «Апатит» для контроля состояния массива ГП. В настоящее время в сейсмическую сеть входят 50 сейсмопавильонов (30 на Кировском руднике и 20 на Расвумчоррском), расположенных на разных высотных отметках шахтного поля. Благодаря реконструкции телеметрической системы сбора и обработки сейсмической информации с 2012 г. расширен список определяемых параметров сейсмических событий. К имеющимся параметрам (дата, время, координаты и энергия событий) добавились новые: сейсмический момент события, размер и механизм очага, динамический и статический сброс напряжения в очаге, магнитуда, сейсмический момент, рассчитанный по P- и S-волнам и др.

Современные технологии позволяют АСКСМ работать практически непрерывно, однако без изменений остается методика прогноза удароопасности (по результатам непрерывного контроля сейсмичности массива).

Сравнение основ двух прогнозных методик – регионального прогноза удароопасности (применяемой в настоящее время) и вероятностного подхода к оценке сейсмической опасности – показало перспективность применения такой методики, поскольку она является более гибкой по сравнению с действующей. Полученные результаты вероятностного подхода могут быть предложены при дальнейшей интерпретации данных сейсмического мониторинга. Так, например, результаты среднесрочного прогноза сейсмической опасности можно применять при ежемесячном планировании мероприятий по прогнозу и предотвращению горных ударов на рудниках. Для ежедневной оценки сейсмической опасности предложено использовать комплексный критерий, который позволяет определять местоположение будущего сильного сейсмического события с вероятностью 0,75, что в полной мере соответствует практике применения сейсмических данных горнодобывающими предприятиями мира.

Исследование особенностей проявления сейсмичности Хибинского массива в виде горных ударов, землетрясений и других видов динамического проявления горного давления и особенно их прогнозирование показывают, что эта проблема остается актуальной в горной промышленности. В связи с этим изучение и совершенствование методов прогноза целесообразно продолжить.

Применение на рудниках АО «Апатит» системы сейсмического мониторинга, становление которой происходило при непосредственном участии Горного института КНЦ РАН, позволяет контролировать состояние массива горных пород в режиме реального времени, что существенно повышает безопасность работ.

Экономический эффект от применения АСКСМ сложно считать в конкретных цифрах для горного производства, но он значителен и заключается в снижении и предотвращении потерь от неблагоприятных сейсмических воздействий. Проведение своевременного прогноза на основе полученных сейсмических данных позволяет заранее выявлять потенциально опасные участки, на которых проводят профилактические мероприятия, а также при необходимости выводить из опасной зоны персонал рудника и дорогостоящее оборудование, что в случае реализации сильного геодинамического явления дает возможность снизить затраты на восстановительные работы, ремонт и/или замену оборудования, компенсации пострадавшим.

Библиографический список

1. Lasocki S., Orlecka-Sikora B., Mutke G., Pytel W., Rudzinski L. A catastrophic event in Rudna copper-ore mine in Poland on 29 November, 2016: what, how and why // *Proceedings of the 9th International Symposium on Rockbursts & Seismicity in Mines*. – Santiago, 2017. P. 316–324.
2. Ptáček J. Rockburst in Ostrava-Karvina Coalfield // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 191. P. 1144–1151.
3. Xia-Ting Feng. *Rockburst: Mechanisms, Monitoring, Warning, and Mitigation*. – Cambridge : Butterworth-Heinemann, 2017. – 570 p.
4. Simser B. P. Rockburst management in Canadian hard rock mines // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019. Vol. 11. Iss. 5. P. 1036–1043.
5. Гурьев А. А. Устойчивое развитие рудно-сырьевой базы и обогатительных мощностей АО «Апатит» на основе лучших инженерных решений // *Записки Горного института*. 2017. Т. 228. С. 662–673.
6. Galchenko Yu. P., Eremenko V. A., Kosyreva M. A., Vysotin N. G. Features of secondary stress field formation under anthropogenic change in subsoil during underground mineral mining // *Eurasian Mining*. 2020. No. 1. P. 9–13. DOI: 10.17580/em.2020.01.02
7. Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В. Бачатское техногенное землетрясение 18 июня 2013 г. с $ML=6.1$, $I_0=7$ (Кузбасс) // *Российский сейсмологический журнал*. 2020. Т. 2. № 1. С. 48–61.
8. Козырев А. А., Семенова И. Э., Журавлева О. Г., Пантелеев А. В. Гипотеза происхождения сильного сейсмического события на Расвумчоррском руднике 09.01.2018 // *ГИАБ*. 2018. № 12. С. 74–83.
9. Mendecki A. J. *Seismic Monitoring in Mines*. – London : Chapman and Hall, 1997. – 262 p.
10. Dineva S., Boskovic M. Evolution of seismicity at Kiruna Mine // *Deep Mining 2017 : Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining*. – Perth : Australian Centre for Geomechanics, 2017. P. 125–140.
11. Сейсмичность при горных работах / под ред. Н. Н. Мельникова. – Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 2002. – 325 с.
12. Онохин Ф. М. Особенности структуры Хибинского массива и апатито-нефелиновых месторождений. – Л. : Наука, 1975. – 106 с.
13. Турчанинов И. А., Марков Г. А., Иванов В. И., Козырев А. А. Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок. – Л. : Наука, 1978. – 256 с.
14. Яковлев В. М. Современные движения земной коры в зоне южного контакта Хибинского массива по данным геометрического нивелирования // *Геофизические и геодинамические исследования на северо-востоке Балтийского щита : сб. ст.* – Апатиты : Изд-во Кольского филиала АН СССР, 1982. С. 88–95.
15. Панасенко Г. Д. Сейсмические особенности северо-востока Балтийского щита. – Л. : Наука, 1969. – 185 с.
16. Панасенко Г. Д. Сейсмичность Восточной части Балтийского щита // *Сейсмичность и современные движения земной коры Восточной части Балтийского щита*. – Апатиты : Изд-во Кольского филиала АН СССР, 1980. С. 12–13.
17. Сырников Н. М., Тряпицын В. М. О механизме техногенного землетрясения в Хибинах // *Доклады Академии наук СССР*. 1990. Т. 314. № 4. С. 830–833.
18. Козырев А. А., Семенова И. Э., Рыбин В. В., Панин В. И., Федотова Ю. В., Константинов К. Н. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (Хибинские апатит-нефелиновые месторождения). – Апатиты, 2016. – 112 с.
19. Сахаров А. Н., Можаяев С. А., Аккуратов М. В. О состоянии массива после длительных горных работ // *Горный журнал*. 2009. № 9. С. 39–42.
20. Корчак П. А., Жукова С. А., Меньшиков П. Ю. Становление и развитие системы мониторинга сейсмических процессов в зоне производственной деятельности АО «Апатит» // *Горный журнал*. 2014. № 10. С. 42–46.
21. Козырев А. А., Федотова Ю. В., Журавлева О. Г., Звонарь А. Ю., Запорожец В. Ю. Выделение зон повышенной сейсмоопасности по комплексу прогностических критериев // *Горный журнал*. 2010. № 9. С. 44–47.
22. Nordström E., Dineva S., Nordlund E. Back Analysis of Short-Term Seismic Hazard Indicators of Larger Seismic Events in Deep Underground Mines (LKAB, Kirunaavaara Mine, Sweden) // *Pure and Applied Geophysics*. 2020. Vol. 177. Iss. 2. P. 763–785.
23. Malovichko D. A. Assessment and testing of seismic hazard for planned mining sequences // *Deep Mining 2017 : Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining*. – Perth : Australian Centre for Geomechanics, 2017. P. 61–77.
24. Завьялов А. Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. – М. : Наука, 2006. – 254 с. [DX](#)

«GORNYI ZHURNAL», 2020, № 9, pp. 19–26
DOI: 10.17580/gzh.2020.09.02

Induced seismicity of rock mass: development of instrumental and methodological support to control seismicity at the Khibiny apatite-nepheline deposits

Information about authors

A. A. Kozыrev¹, Head of Department for Geomechanics, Professor, Doctor of Engineering Sciences

V. S. Onuprienko², Chief Engineer

S. A. Zhukova¹, Senior Researcher, Candidate of Engineering Sciences, svetlana.zhukowa@yandex.ru

O. G. Zhuravleva¹, Senior Researcher, Candidate of Engineering Sciences

¹Mining Institute, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

²Apatit's Kirovsk Division, Kirovsk, Russia

Abstract

The paper presents a study of seismicity in the Khibiny massif and reviews development stages of seismic monitoring system and methods for predicting seismic hazard.

A brief review of earthquakes in the Khibiny massif, which occurred from the beginning of the development of apatite-nepheline deposits to the present day, is given. The largest earthquake of magnitude 4.2 occurred on April 16, 1989 at the Kukisvumchorr deposit.

The paper describes the main stages of seismic monitoring system development for mines in the Khibiny massif in operation by Apatit JSC, and the importance of the Mining Institute of the Kola Science Center, RAS in the formation of this system are given. The monitoring system was first introduced in Kirovsk mine (Kukisvumchorr and Yukspor deposits) and later in Rasvumchorr mine. These seismic monitoring systems have become one of the most important tools of the Rockburst Prediction and Prevention Service of Apatit JSC. They allow monitoring the state of rock mass in real time. This significantly increases safety of mining operations both in terms of operational decision-making and mid-term and long-term preventive measures.

The authors studied the features of seismic activity during mining operations. The basics of two prediction techniques are presented. These techniques are the regional prediction of rockburst hazard using continuous monitoring of seismicity and the modern probabilistic approach to seismic hazard assessment. The results of the probabilistic approach to the seismic hazard assessment prove efficiency of the proposed methodology which can be used in the interpretation of seismic monitoring data.

Keywords: induced seismicity, monitoring, regional prediction, local prediction, rockbursts, earthquakes, Khibiny massif.

References

1. Lasocki S., Orlecka-Sikora B., Mutke G., Pytel W., Rudzinski L. A catastrophic event in Rudna copper-ore mine in Poland on 29 November, 2016: what, how and why. *Proceedings of the 9th International Symposium on Rockbursts & Seismicity in Mines*. Santiago, 2017. pp. 316–324.
2. Ptáček J. Rockburst in Ostrava-Karvina Coalfield. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 191. pp. 1144–1151.
3. Xia-Ting Feng. *Rockburst: Mechanisms, Monitoring, Warning, and Mitigation*. Cambridge : Butterworth-Heinemann, 2017. 570 p.
4. Simser B. P. Rockburst management in Canadian hard rock mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019. Vol. 11, Iss. 5. pp. 1036–1043.
5. Gurev A. A. Sustainable development of crude ore resources and beneficiation facilities of JSC «Apatit» based on best engineering solutions. *Journal of Mining Institute*. 2017. Vol. 228. pp. 662–673.
6. Galchenko Yu. P., Eremenko V. A., Kosyreva M. A., Vysotin N. G. Features of secondary stress field formation under anthropogenic change in subsoil during underground mineral mining. *Eurasian Mining*. 2020. No. 1. pp. 9–13. DOI: 10.17580/em.2020.01.02
7. Emanov A. F., Emanov A. A., Fateev A. V. Bachatskiy induced earthquake on June 18, 2013, $ML=6.1$, $I_0=7$ (Kuzbass). *Rossiyskiy seismologicheskiy zhurnal*. 2020. Vol. 2, No. 1. pp. 48–61.
8. Kozыrev A. A., Semenova I. E., Zhuravleva O. G., Panteleev A. V. Hypothesis of strong seismic event origin in Rasvumchorr mine on January 9, 2018. *GIAB*. 2018. No. 12. pp. 74–83.
9. Mendecki A. J. *Seismic Monitoring in Mines*. London : Chapman and Hall, 1997. 262 p.
10. Dineva S., Boskovic M. Evolution of seismicity at Kiruna Mine. *Deep Mining 2017 : Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining*. Perth : Australian Centre for Geomechanics, 2017. pp. 125–140.
11. Melnikov N. N. (Ed.). *Seismicity during mining*. Apatity : Publishing House of Kola Science Center RAS, 2002. 325 p.
12. Onokhin F. M. *Structural features of the Khibiny massif and apatite-nepheline deposits*. Leningrad : Nauka, 1975. 106 p.
13. Turchaninov I. A., Markov G. A., Ivanov V. I., Kozыrev A. A. *Crustal tectonic stresses and stability of underground excavations*. Leningrad : Nauka, 1978. 256 p.

14. Yakovlev V. M. Present-day crustal movements in the south wallrock area of the Khibiny massif by geometric leveling data. *Geophysics and geodynamics of the northeastern Baltic Shield: Collected papers*. Apatity: Izdatelstvo Kolskogo filiala AN SSSR, 1982. pp. 88–95.
15. Panasenko G. D. Seismic features of the northeastern Baltic Shield. Leningrad: Nauka, 1969. 185 p.
16. Panasenko G. D. Seismicity of the eastern Baltic Shield. *Seismicity and present-day crustal movements in the east of the Baltic Shield*. Apatity: Izdatelstvo Kolskogo filiala AN SSSR, 1980. pp. 12–13.
17. Syrnikov N. M., Tryapitsyn V. M. On the mechanism of the technogeneous earthquake in Khibiny. *Transactions (Doklady) of the USSR Academy of Sciences. Earth Science Sections*. 1990. Vol. 314, No. 4. pp. 830–833.
18. Kozыrev A. A., Semenova I. E., Rybin V. V., Panin V. I., Fedotova Yu. V., Konstantinov K. N. Guidelines for safe mining under conditions of rockburst hazard (Khibiny apatite–nepheline deposits). Apatity, 2016. 112 p.
19. Saharov A. N., Mozhaev S. A., Akkuratov M. V. About state of the massif after long-term mining operations. *Gornyi Zhurnal*. 2009. No. 9. pp. 39–42.
20. Korchak P. A., Zhukova S. A., Menshikov P. Yu. Seismic monitoring build-up and development in the production activity zone of Apatit JSC. *Gornyi Zhurnal*. 2014. No. 10. pp. 42–46.
21. Kozыrev A. A., Fedotova Yu. V., Zhuravleva O. G., Zvonar A. Yu., Zaporozhets V. Yu. Extraction of zones with increased seismic hazard via the complex of prognostic criteria. *Gornyi Zhurnal*. 2010. No. 9. pp. 44–47.
22. Nordström E., Dineva S., Nordlund E. Back Analysis of Short-Term Seismic Hazard Indicators of Larger Seismic Events in Deep Underground Mines (LKAB, Kiirunavaara Mine, Sweden). *Pure and Applied Geophysics*. 2020. Vol. 177, Iss. 2. pp. 763–785.
23. Malovichko D. A. Assessment and testing of seismic hazard for planned mining sequences. *Deep Mining 2017: Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining*. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2017. pp. 61–77.
24. Zavyalov A. D. Mid-term earthquake prediction: Fundamentals, procedure, implementation. Moscow: Nauka, 2006. 254 p.

УДК 622.831.232

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОТРАБОТКИ СБЛИЖЕННЫХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В УДАРОПАСНЫХ УСЛОВИЯХ



И. З. СЕМЕНОВА,

ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук,
innas@goi.kolasc.net.ru

Горный институт Кольского научного центра РАН,
Апатиты, Россия

Введение

Сегодня в мире и Российской Федерации существуют несколько регионов, где ведется одновременная отработка крупных месторождений, что влечет за собой необходимость решения целого спектра задач. Одной из таких задач является минимизация негативного воздействия на биосферу: водный и воздушный бассейн, земную поверхность, недра, растительный и животный мир. Техногенное воздействие крупномасштабных горных разработок вносит также серьезные изменения в напряженно-деформированное состояние (НДС) протяженных участков земной коры и может являться причиной геодинамических явлений с катастрофическими последствиями. Особенно актуальной является задача геомеханического обоснования и прогнозов трансформации НДС по мере развития крупномасштабных горных работ в пределах рудных полей с выраженным действием тектонических напряжений, предопределяющих отнесение месторождений к склонным и опасным по горным ударам.

Как отмечает большинство специалистов, занимающихся геомеханическим обоснованием отработки запасов как подземным, так и открытым способами, изученность геологического строения месторождений, и в особенности вмещающего массива, на стадии принятия проектных решений является недостаточной [1–7]. Кроме того, данные о типе и параметрах НДС массива не всегда

Описан сложившийся в Горном институте КНЦ РАН научный подход решения геомеханических задач при разработке сближенных рудных месторождений в условиях действия высоких тектонических напряжений. Проблема изучена на примере Хибинского массива, где добыча апатит-нефелиновых руд ведется в удароопасных условиях одновременно на семи месторождениях. Предложено геомеханическое обоснование совместного ведения открытых и подземных горных работ на основе трехмерного моделирования напряженно-деформированного состояния массива скальных пород, предполагающего генерацию комплекса разномасштабных конечно-элементных моделей от рудного поля до отдельных элементов горной технологии.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, подземные и открытые горные работы, численное моделирование, сближенные месторождения, геодинамические риски, управление, геомеханические процессы, мониторинг.

DOI: 10.17580/gzh.2020.09.03

достоверны [8, 9]. Это ключевая проблема, с которой в той или иной мере связаны перечисленные ниже.

Во-первых, отработка блоков-целиков, что в условиях удароопасности сопряжена с дополнительными геомеханическими и геодинамическими рисками. Уменьшение числа стыковочных зон между встречными фронтами горных работ должно происходить еще на стадии регламентирования и проектирования выемки запасов. Во-вторых, особенности НДС подработанной толщи пород и прогноз развития процессов трещинообразования, сдвига и обрушения до земной поверхности с учетом развития горных работ на смежных месторождениях. В-третьих, выбор технологий отработки запасов и разработка региональных и локальных мероприятий, учитывающих конкретные геологические, технологические и геомеханические аспекты месторождения, горизонта, блока.